

2 Sistemas Laser de Medição

2.1

Breve Histórico e Conceitos Básicos

O termo laser provém das iniciais em inglês de *Amplificação de Luz por meio de Emissão Estimulada de Radiação* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) que se refere ao processo de emissão do raio laser [2].

Em 1917, os trabalhos de Albert Einstein na área de física quântica delinearam os princípios que tornariam possível o desenvolvimento da tecnologia dos lasers e sua aplicação prática.

No final da década de 40, Charles Townes, então professor da Universidade de Columbia, em Nova Iorque, realizava estudos espectroscópicos de moléculas utilizando radiação de microondas. Com o propósito de produzir microondas mais curtas, do que aquelas utilizadas nos radares da Segunda Guerra Mundial, decidiu utilizar moléculas e a radiação estimulada (conceito introduzido por Einstein) delas proveniente, o que resultou na radiação estimulada de comprimento de onda de 1cm, denominada *maser*, referindo-se à radiação estimulada na região de microondas. O maser foi, assim, o precursor do laser e, ao final dos anos 50, verificou-se que a radiação poderia ser estimulada na faixa espectral que vai das microondas à luz visível. Novamente, Townes e Arthur Schawlow demonstraram, teoricamente, que era possível utilizar átomos para gerar um maser óptico, que foi denominado laser, ou seja, simplesmente um maser que produzisse radiação na região visível do espectro eletromagnético. Foi Theodore Maiman que, em 1960, conseguiu fazer funcionar o primeiro laser sólido, a partir de um cristal de rubi, e foi Javan a produzir o primeiro laser a gás, a partir de uma mistura dos gases nobres hélio e neônio (figura 2.1).

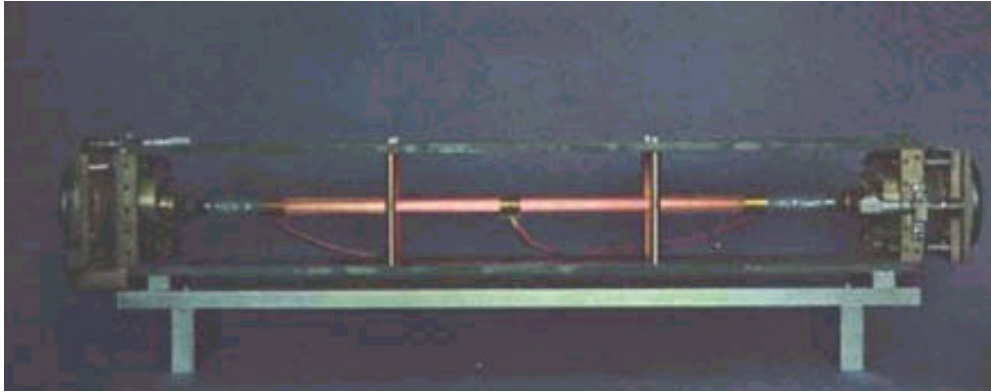


Figura 2.1- Primeiro laser a gás constituído por uma mistura dos gases nobres He e Ne

Muitos pesquisadores que trabalhavam em pesquisa fundamental à época, em vários países, contribuíram para o advento do laser, mas nem cogitavam sobre o grande número de aplicações futuras. Nas palavras de Townes, "*o desenvolvimento do maser e do laser não seguiu nenhum roteiro, ele simplesmente nasceu da natureza dos cientistas no seu desejo de entender, explorar e criar. Ele é um exemplo gritante de como tecnologias importantes, aplicáveis aos interesses humanos, podem nascer da pesquisa básica feita na universidade*". Assim, em 1964, o americano Townes e os russos Basov e Prokorov que, independentemente, deram contribuição significativa na área de lasers sólidos, semicondutores, foram agraciados com o prêmio Nobel de Física pelo trabalho fundamental na área da eletrônica quântica que levou à construção dos sistemas maser e laser [3].

2.2

Princípios da Física do Laser

Para entender o mecanismo pelo qual o Laser funciona, alguns conceitos básicos de física necessitam ser comentados. Para isso faz-se necessário reportar ao ano de 1913, no campo da física quântica, quando Niels Bohr propôs um modelo atômico onde os elétrons giram ao redor do núcleo em orbitais fixos e com energia definida, podendo os átomos estar em níveis de energia distintos, por exemplo, E_0 e E_1 . Assim, toda vez que ocorre um movimento de um nível de energia para outro, há um ganho ou perda de uma quantidade de energia, ou seja, de um quantum na forma de radiação eletromagnética, ou seja, de um fóton.

No processo de emissão espontânea de energia, tem-se que um átomo pode ser elevado a partir do seu nível de energia estável (E_0) para um nível excitado (E_1), através da absorção de um quantum de energia. A energia de excitação pode ser causada por choque entre átomos, partículas e moléculas e, ainda, por ondas eletromagnéticas. Por ser o nível (E_1) inerentemente menos estável, então o átomo tenderá a voltar para o nível E_0 , emitindo o mesmo quantum de energia na forma de fótons.

No processo de emissão estimulada de energia, princípio de ação do laser, um quantum adicional de energia é absorvido por um átomo em seu estado elevado de energia (E_1), causando a posterior liberação de dois quanta de energia, quando este retorna para o seu estado mais estável (E_0). Trata-se do processo de estimulação ou amplificação de energia, o qual ocorre quando há um maior número de átomos excitados do que não excitados.

Na emissão espontânea de radiação o átomo passa do estado excitado para o estado fundamental sem nenhuma ajuda externa. Esta emissão é considerada não coerente porque os átomos liberam energia independentemente entre si, sem relação de fase, direção ou polaridade entre as emissões. Desta maneira, a radiação é multidirecional, sendo apenas a frequência fixada pelo intervalo entre os níveis de energia.

2.3

Características do Feixe Laser

O feixe luminoso emitido por um processo estimulado possui características particulares. Todos os fótons emitidos apresentam o mesmo nível de energia, com variações mínimas. Portanto, todos os feixes que compõem a luz têm o mesmo comprimento de onda, ou seja, a luz resultante é monocromática. Além disso, o fóton emitido move-se paralelamente aos fótons que provocaram a emissão estimulada devido à lei da conservação do momento. O feixe é emitido em uma só direção ao invés de se espalhar, resultando em luz altamente colimada.

Finalmente todos os fótons têm a mesma frequência, mesma fase e mesma polarização, o que caracteriza a radiação resultante como coerente. Essas propriedades constituem as características essenciais de todo feixe laser.

2.4

Componentes do Sistema de Geração do Laser

Como mencionado anteriormente, raios laseres podem ser gerados em distintos sistemas. Comum a todos eles é o fato de que se necessita de uma cavidade óptica, que deverá ser estimulada por uma fonte de energia (mecanismo de bombeamento), de um meio ativo e de um par de espelhos, responsável pela reflexão dos fótons que realimentam o sistema.

O mecanismo de bombeamento funciona por meio de uma fonte externa de energia responsável pelo fornecimento de energia ao meio ativo. Pode ser uma lâmpada flash ou até outro laser (bombeamento óptico); podem ser descargas elétricas (bombeamento eletrônico); reações químicas (bombeamento químico); e partículas pesadas ou radiações ionizantes ou térmicas.

Os meios ativos são a base atômica do sistema. É um meio que possui níveis de energia excitáveis e capaz de armazenar a energia recebida da fonte externa. Os meios ativos podem ser sólido (semicondutor ou não), gasoso ou líquido. Os exemplos de meios ativos são:

- a. Gasoso - CO₂, Argônio, Hélio-Neônio;
- b. Isolantes dopados - Cr₃₊, cristais de Nd:YAG (Yttrium Aluminium Garnet), Er:YAG, Ho:YAG;
- c. Corantes - corantes orgânicos diluídos em solventes líquido (Rodamina 6G e Cumarina 2);
- d. Semicondutores - vários tipos de diodo;
- e. Excímeros - moléculas diatômicas (KrF, XeCl) e químicos - produzidos por reações exotérmicas (HF, CO).

A cavidade óptica é uma câmara que contém o meio ativo, onde o raio laser é gerado. Esta cavidade recebe o nome de cavidade de Perot-Fabry.

O tamanho e a forma da cavidade variam de acordo com o meio ativo e a potência do aparelho laser. Na cavidade, dois espelhos com níveis de reflexão diferentes são posicionados em suas extremidades: um deles é totalmente refletivo e o outro, parcialmente refletivo. A diferença de capacidade de reflexão dos espelhos permite a saída da radiação de dentro da cavidade, formando o raio laser.

2.5

Classificação dos Laseres

Os aparelhos laseres são classificados quanto ao meio ativo empregado. Como mencionado anteriormente este pode ser sólido, gasoso ou líquido.

O laser com meio ativo sólido mais comum é o que emprega um bastão de rubi artificial ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,05\% \text{Cr}_2\text{O}_3$) e uma lâmpada de flash.

As duas extremidades do bastão de rubi são planas, paralelas e prateadas para atuarem como espelhos. Uma das extremidades é semitransparente, de modo que o feixe luminoso resultante possa sair da cavidade óptica (não mais que 1% da luz incidente consegue passar pelo espelho). O bastão de rubi é envolvido por um tubo luminoso contendo xenônio ou outro gás adequado. Quando um pulso de eletricidade passa pelo tubo luminoso, o gás se ioniza e brilha por instantes. Essa luz é absorvida por átomos de cromo no cristal de rubi, levando os elétrons que se encontravam no estado fundamental para o nível metaestável. As radiações, em virtude dos espelhos, são continuamente refletidas de um lado para o outro, criando um conjunto de ondas estacionárias ao longo do cristal. A luz produzida, por sua vez, é emitida através do espelho semitransparente.

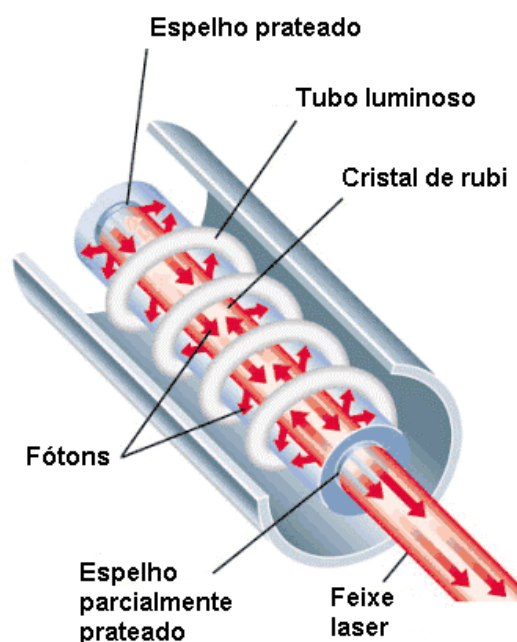


Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um laser com meio ativo sólido.

O laser com meio ativo gasoso mais comum é o que utiliza uma mistura dos gases hélio e neônio. Esta mistura (10% de neônio, sendo o restante hélio) em baixa pressão é contida em um tubo cilíndrico de vidro ou quartzo. Dois espelhos são colocados pelo lado de fora do tubo, devendo ficar rigorosamente paralelos às suas extremidades planas. Este, por sua vez, é envolvido por uma bobina ligada a um gerador de alta frequência (mecanismo de bombeamento), que mantém uma descarga elétrica ao longo do tubo, constituindo um plasma, pois a colisão dos elétrons com os átomos predominantemente de hélio cria íons, e resultando na excitação de muitos átomos para níveis altos de energia. A partir da excitação do gás neônio, é produzido um feixe luminoso que se reflete nos espelhos, voltando a incidir na mistura gasosa gerando mais fótons. De novo, um dos espelhos é semitransparente e deixa passar certa porção do feixe luminoso, permitindo a emissão do raio laser.

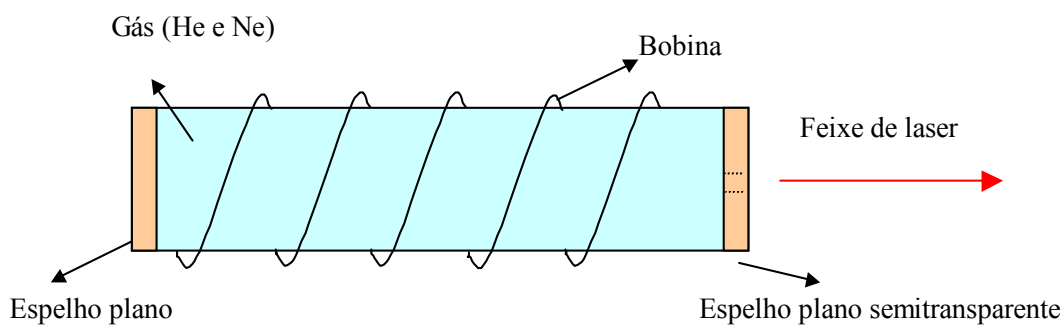


Figura 2.3 – Esquema do funcionamento de um laser com meio ativo gasoso

O laser com meio ativo semicondutor utiliza semicondutores, que são materiais que têm características intermediárias entre os isolantes e os condutores de eletricidade. O laser a semicondutor também chamado de diodo laser é composto pela junção de duas camadas de semicondutores com diferentes características elétricas. Ao ser percorrido por uma corrente elétrica o semicondutor (geralmente Arseneto de Gálio, Arseneto de Índio, Nitreto de Gálio, etc) permite que cada elétron que se combina com uma lacuna na região da junção emita um fóton. O laser semicondutor também tem uma cavidade óptica contendo dois espelhos paralelos entre si e perpendiculares a radiação, e esta cavidade permite que a luz seja refletida várias vezes até sair pelo espelho menos refletor. As extremidades do diodo laser são clivadas, ou seja, cortadas em planos paralelos às faces do cristal semicondutor, atuando com espelhos semitransparentes.

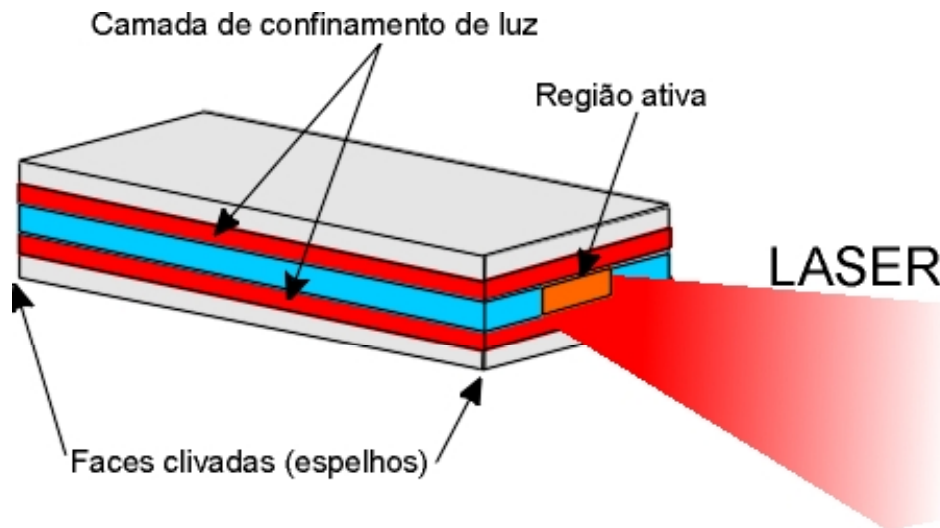


Figura 2.4 – Esquema do funcionamento de um laser com meio semiconductor

É importante salientar a vasta aplicação dos lasers. Aqueles com meio ativo sólido e líquido, chamados lasers de impulsos apresentam uma alta potência e concentram grande quantidade de energia em pequenas áreas resultando em altas temperaturas localizadas e, portanto, podem ser utilizados para, perfurar e cortar chapas de aço. A medicina usa lasers das mais variadas maneiras. Eles têm sido empregados, por mais de uma década, em especialidades cirúrgicas de oftalmologia, ginecologia, ortopedia, otorrinolaringologia, urologia, cirurgia plástica, gastroenterologia, dermatologia, cardiologia e, mais recentemente, em estudos da fisiologia da circulação, da imunologia e até mesmo no diagnóstico de alguns cânceres.

Os lasers com meios ativos gasoso e semiconductor, chamados lasers de emissão contínua, são empregados em telecomunicações, medição em obras de engenharia, microsoldagem de circuitos elétricos, produção de aparelhos ópticos de extrema exatidão, produção de hologramas, impressoras, unidades de fabricação e de leitura de CDs e metrologia dimensional.

Entretanto, no que diz respeito ao presente trabalho, a aplicação do laser se dá por conta do fenômeno da interferometria, que permite a medição de comprimento com incertezas bastante pequenas, conforme detalhado mais à frente.

2.6

Interferômetro de Michelson

Desde o tempo de Newton até ao princípio do século XIX, a maioria dos físicos defendia a teoria corpuscular. No entanto, no princípio daquele século, o físico inglês Thomas Young mostrou que a luz apresentava fenômenos de interferência, o que indicava que possuía características ondulatórias.

O efeito chamado interferência ocorre quando ondas idênticas (a menos de uma diferença de fase), provenientes de duas fontes, superpõem-se em um ponto do espaço, e a intensidade resultante das ondas que se combinam naquele ponto pode ser maior (interferência construtiva) ou menor (interferência destrutiva) do que a intensidade de cada uma delas.

A princípio, qualquer número de ondas pode interferir mas se considerará aqui a interferência de duas ondas somente. Supõe-se que a fonte de cada uma delas emita em um único comprimento de onda e que a relação entre suas fases não varia com o tempo. Tais ondas são denominadas coerentes. Quando ondas coerentes interferem, a intensidade da onda combinada em qualquer ponto do espaço não varia com o tempo. A coerência é uma condição necessária para que ocorra interferência.

O fenômeno da interferência tem muitas aplicações, dentre elas a utilização em um instrumento chamado interferômetro óptico. Este é um dispositivo que pode ser utilizado para medição, com grande exatidão, de comprimentos ou variações de comprimentos, tendo sido utilizado primeiramente por Michelson em 1881 [3], conforme experimento descrito a seguir:

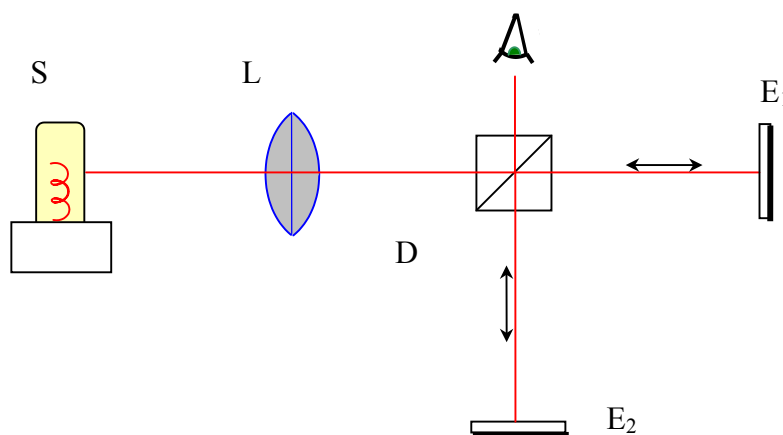


Figura 2.5 – Interferômetro de Michelson

O feixe de luz proveniente da fonte S, passando pela lente L (para tornar o feixe paralelo) foi direcionado a um prisma semiprateado D (figura 2.5) chamado divisor de feixe de luz. Este tem um revestimento de prata com espessura suficiente para transmitir metade da luz incidente e refletir a outra metade em um ângulo que depende do alinhamento do divisor de feixe; admitiu-se, para simplificação da figura, que o espelho tenha espessura desprezível [4]. Em D, a luz divide-se em duas ondas. Em cada percurso do feixe, Michelson posicionou um espelho plano. Uma onda prossegue, por transmissão, para o espelho E_1 ; a outra, devido à reflexão, vai até E_2 . As ondas são refletidas em cada um destes espelhos e enviadas de volta ao longo de suas direções de incidência e são recombinadas por D.

Ilustrando a experiência de Michelson, quando os espelhos estão a distâncias iguais do ponto de separação em D e perpendiculares entre si, o caminho geométrico da luz percorrido será o mesmo e os feixes retornarão em fase e se combinarão construtivamente (brilho).

Se um dos espelhos é movido de $\lambda/4$ em relação ao divisor de feixe, o feixe de luz percorrerá um caminho adicional de $\lambda/2$ e os dois feixes estarão defasados de 180° ($\lambda/2$). Neste caso os dois feixes se combinarão destrutivamente.

Enquanto o espelho percorre a distância $\lambda/4$, pode ser observado que o brilho gradualmente se transforma em ausência de luz. Movendo-se o espelho por mais $\lambda/4$, observa-se novamente a presença de luz (brilho).

Como mencionado anteriormente, para que haja interferência entre dois raios luminosos é necessário que suas ondas sejam coerentes, o que não é possível com duas lâmpadas por mais semelhantes que sejam. Por isso é usado o processo do interferômetro: nele os dois raios luminosos partem da mesma fonte, garantindo a mesma frequência e fase, só diferindo no caminho geométrico da luz.

Michelson também utilizou o interferômetro para medir, com grande exatidão, o diâmetro angular de corpos celestes, inclusive estrelas. Foi ele, também, que sugeriu utilizar as ondas luminosas como padrão para definir o metro. Até então a unidade de comprimento era definida a partir de uma barra metálica (liga de Pt e Ir) mantida no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) em Paris.

2.7

Princípio de Funcionamento do Laser para Medição Linear

O desenvolvimento do laser interferométrico foi um grande avanço na capacidade de se medir facilmente distância com exatidão. Os sistemas lasers de medição linear podem medir distâncias até dezenas de metros com uma resolução de um milionésimo de milímetro.

O sistema laser de medição linear foi desenvolvido a partir do interferômetro de Michelson. Dependendo do arranjo óptico, o sistema é capaz de realizar medições lineares, angulares e de retitude, sendo necessário apenas três tipos de arranjos. O esquema de montagem e componentes utilizados, para uma medição linear, é explicitado na figura 2.6.

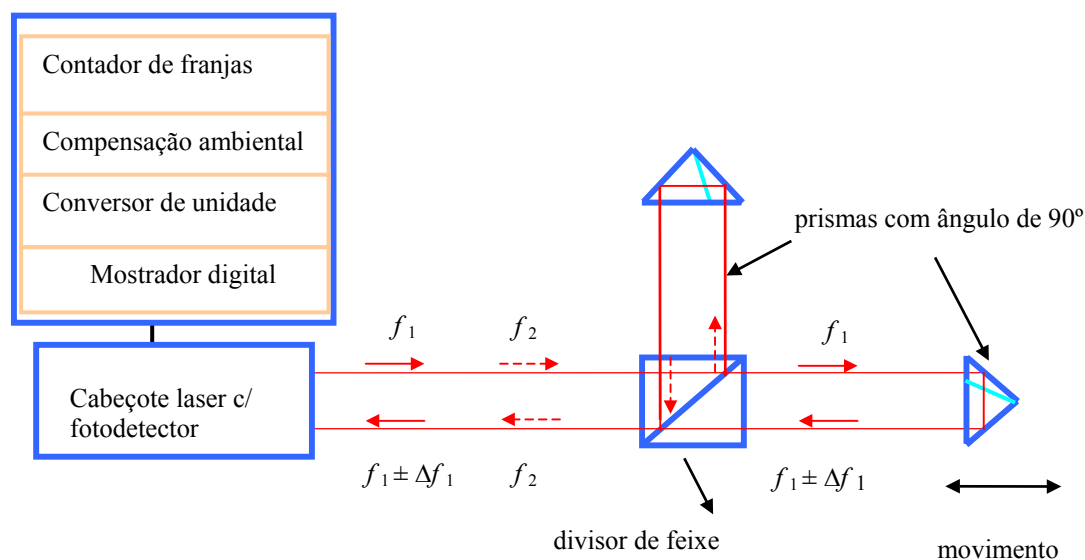


Figura 2.6 – Partes de um Sistema Laser de Medição

Em geral, os sistemas laser de medição utilizados na medição de comprimento, emitem radiação em duas frequências muito próximas entre si (f_1 e f_2) com polarizações circulares opostas. Isto é conseguido por meio da aplicação de um campo magnético externo durante a emissão, o que provoca um desdobramento nas linhas espectrais pelo efeito do alinhamento do momento magnético associado ao átomo. Este efeito chamado de Zeeman foi primeiramente pesquisado pelo físico holandês Pieter Zeeman, em 1902.

O feixe proveniente da cavidade óptica contendo ambas as freqüências passa através de placas polarizadoras do tipo $\lambda/4$ e $\lambda/2$, que tem o objetivo de transformar a polarização circular das freqüências em polarização linear, uma na vertical e a outra na horizontal. O feixe polarizado linearmente é expandido em um telescópio colimador, que a seguir atinge o divisor de feixe, que tem característica polarizadora, dividindo assim em dois componentes (figura 2.7). Um componente passa pelo divisor, por exemplo, f_1 e o outro é refletido perpendicularmente (f_2). A reflexão dos dois componentes é feita nos espelhos, em forma de triédros e chamados retrorefletores (prismas), para permitir o retorno paralelo do feixe. Um dos retrorefletores (prisma de referência) é fixado ao divisor de feixe e o outro se move independente do divisor [5].

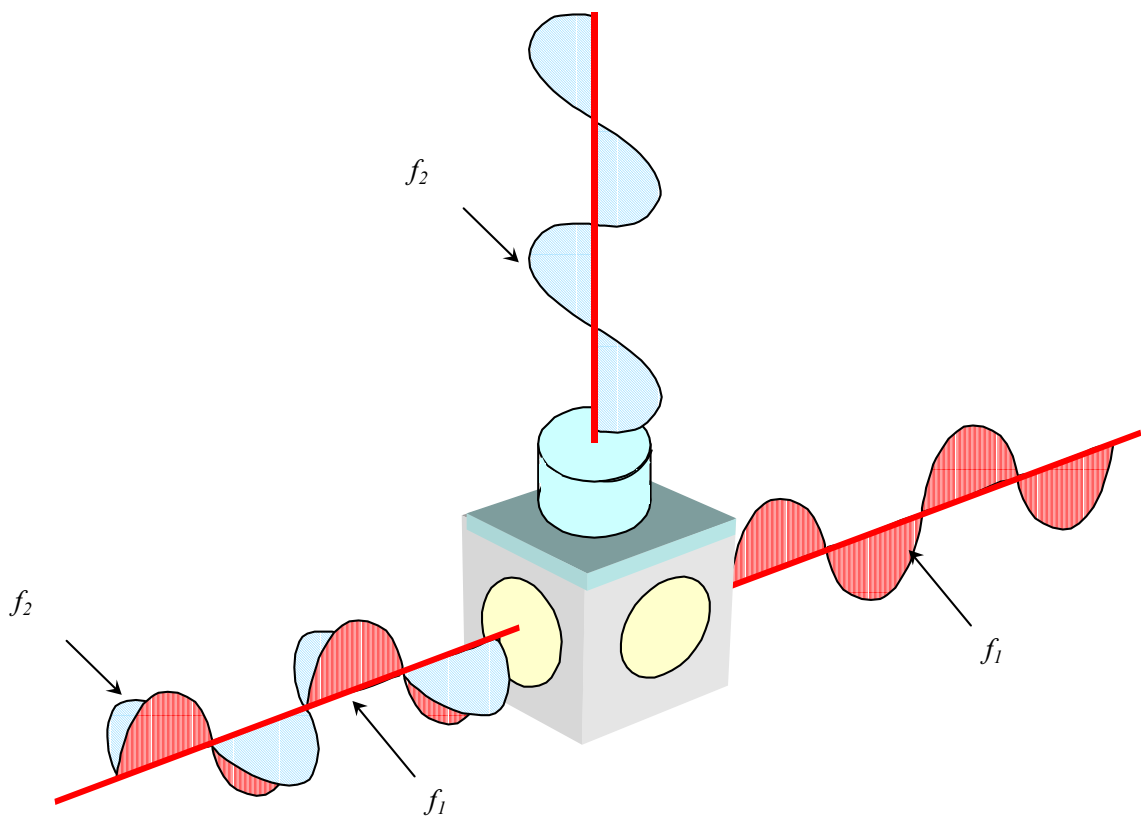


Figura 2.7 – Princípio de funcionamento do divisor de feixe do laser [6]

Os dois componentes, após a reflexão em seus respectivos retrorefletores, se recombinam no divisor de feixe resultando na composição do feixe contendo f_1 e

f_2 . Havendo qualquer deslocamento do retrorefletor móvel, haverá uma variação Δf na frequência do componente do feixe nele refletido, devido ao efeito Doppler-Fizeau. O sinal de retorno, agora composto por $f_1 \pm \Delta f$, volta ao cabeçote onde é captado por um fotodetector, que converterá o sinal luminoso em sinais eletrônicos. A contagem de pulsos defasados é realizada por batimento de frequência, sendo os sinais convertidos em números de $\lambda/4$.

O número de $\lambda/4$ é estocado em contadores que, após as compensações devidas a influências no comprimento de onda e efeitos térmicos sobre o padrão em calibração, é convertido em milímetros.

2.8

Aplicação do Laser Específica em Metrologia Dimensional

2.8.1

Calibração de Máquinas-Ferramenta

Devido à demanda por alta produtividade, quando são utilizadas máquinas-ferramenta como meio de produção, os fabricantes de máquinas são forçados a confiar menos na habilidade do ferramenteiro para assim dar mais ênfase na exatidão da própria máquina-ferramenta, o que a torna a principal responsável pela qualidade do produto acabado. Sendo assim, tornou-se imperativo que os construtores e usuários de máquinas-ferramenta estudassem melhorias das características construtivas das mesmas [7], que levassem à diminuição de desvios e incertezas nos ensaios geométricos utilizados na sua avaliação. Entretanto, o maior problema associado ao estudo e avaliação de máquinas-ferramenta era a falta de um padrão de comprimento adequado, ou seja, que tivesse 1 m ou mais e que permitisse medições com baixa incerteza.

A avaliação da exatidão de posicionamento, por exemplo, era realizada por meio de um padrão físico chamado de barra de escala. Este era construído com suficiente exatidão com comprimento de aproximadamente um metro. Contudo, eram necessários padrões maiores que, geralmente, eram inexatos. Para se avaliar a exatidão de posicionamento das máquinas-ferramenta de grande porte, utilizavam-se métodos que mediam o comprimento por partes. O processo era extremamente longo e tedioso e os resultados obtidos eram freqüentemente não

repetitivos e raramente indicativos da exatidão da máquina-ferramenta sob avaliação.

Procurando atender essa necessidade foi desenvolvido o sistema laser de medição linear que é um padrão com grande exatidão e uma versatilidade de aplicação para determinação dos erros geométricos em máquinas.

O desenvolvimento do sistema laser de medição proporcionou para a indústria de máquinas-ferramenta um padrão de comprimento de alta exatidão que pode ser usado em máquinas de todas as dimensões. O valor de incerteza do sistema laser de medição é da ordem de 0,5 parte por milhão, valor comparável à incerteza dos melhores padrões físicos disponíveis, e certamente aceitável para avaliação de máquinas-ferramenta. Além disso, o sistema laser de medição é fácil de usar permitindo que medições sejam feitas em pouco tempo.

A avaliação metrológica de máquinas-ferramenta tem como objetivo detectar e mensurar desvios nos graus de movimentos dos eixos (na norma, erros geométricos). Quando um objeto se move linearmente em uma direção do eixo X, há seis graus de movimento (figura 2.8) que vão afetar a posição final do objeto. Além do erro de posicionamento ao longo do eixo X, que está relacionado diretamente à exatidão linear da escala, o objeto pode também ter rotações angulares sobre os eixos X, Y, e Z chamadas de desvio de rolamento (roll), desvio de guinamento (yaw) e tombamento (pitch), respectivamente. Movimentos translacionais nos eixos Y e Z são identificados como ausência de retitude nos movimentos vertical e horizontal, respectivamente. Ao todo, existem seis graus de liberdade de movimento que influenciam a posição final do objeto quando este é deslocado na direção de um determinado eixo. Se considerarmos um sistema de posicionamento com 3 eixos, então haverá 18 graus de liberdade (6 graus de liberdade por eixo) além dos erros introduzidos por ausência de ortogonalidade entre os eixos. Portanto, são 21 as fontes de erros potenciais que se combinam para definir a posição final do objeto a ser usinado [6].

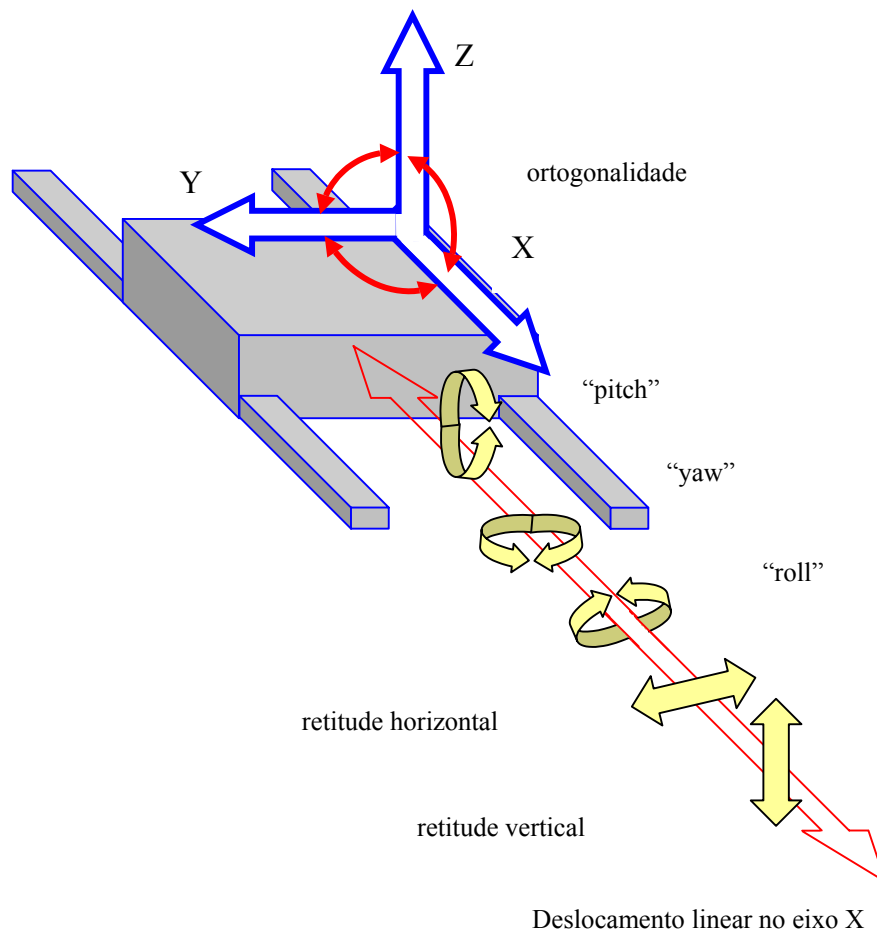


Figura 2.8 -Seis graus de liberdade do movimento uma máquina

Com o sistema laser de medição é possível medir cinco dos seis graus de liberdade de uma máquina-ferramenta: erro de posicionamento linear (figura 2.9), retitude de dois planos, guinamento (yaw), tombamento (pitch), que podem ser medidos pelo uso de componentes ópticos apropriados. Os erros máximos admissíveis para o ensaio de posicionamento de máquinas-ferramenta variam de 0,006 mm a 0,042 mm e são apresentados no Apêndice 1, cujas informações foram retiradas da norma ISO 10791– 4:1998 “Test conditions for machining centres – part 4: accuracy and repeatability of positioning of linear and rotary axes” [8].

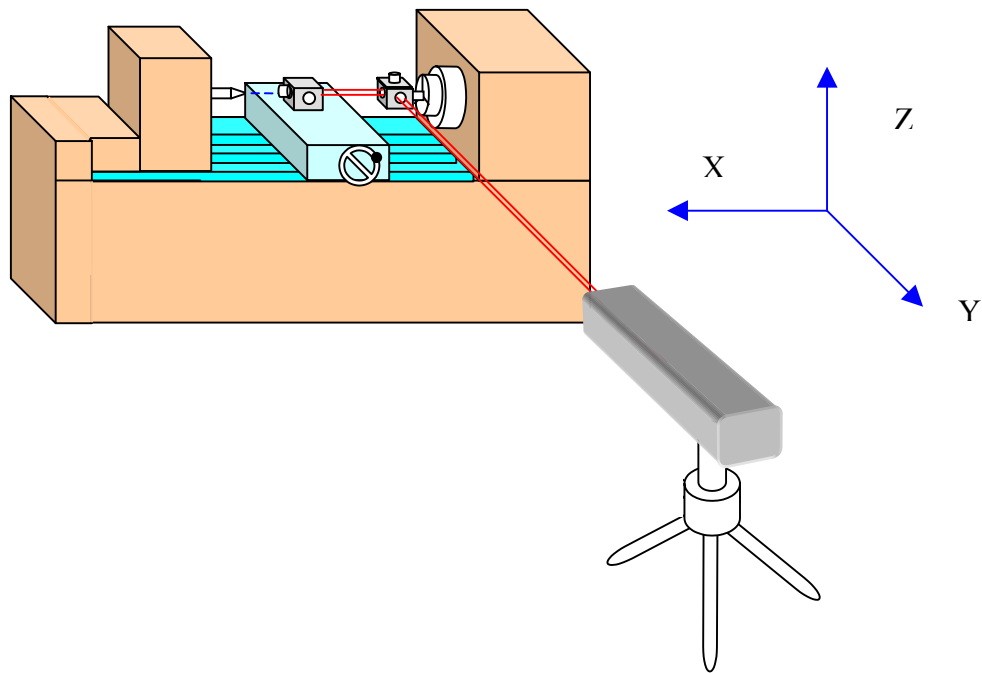


Figura 2.9 – Medição de posicionamento em X de um torno mecânico

2.8.2

Calibração de Máquina de Medição

Com o desenvolvimento de máquinas-ferramenta numericamente controladas, os projetos, a fabricação e o controle de qualidade tiveram mudanças consideráveis. A maioria das indústrias tem como objetivo produzir produtos com qualidade e rapidez, buscando atingir um mercado cada vez mais exigente. Portanto, as medições convencionais para avaliação dimensional desses produtos já não atendem estes requisitos. Surgiram então as Máquinas de Medição por Coordenadas MMCs (ou Máquina de medir a três Coordenadas MM3Cs), com várias vantagens em relação à metrologia convencional.

Devido à complexidade das MMCs, seus usuários e fabricantes elaboraram várias normas com objetivo de determinar seu desempenho. Normas como VDI/VDE 2617:1986 [9] e ISO 10360:2001 [10] são exemplos deste esforço.

A utilização do sistema laser de medição para verificação de MMCs é recomendada com bastante frequência na determinação dos mesmos erros geométricos mencionados para verificação das máquinas-ferramenta. Como a construção de MMCs é similar à das máquinas-ferramenta (quando a mesma é do tipo que tem movimento nos três eixos), os parâmetros a se determinar são os

mesmos. Porém, a exatidão requerida é na maioria dos casos superior à exatidão das máquinas-ferramenta, pois as incertezas envolvidas na determinação dos erros de medição de MMCs devem ser bem menores.

Um outro motivo para utilização de sistema laser de medição para verificação de MMCs é que muitas máquinas são de grande porte (quando estas têm o comprimento acima de um metro em um dos seus eixos), o que requereria padrões de grandes dimensões que são muito caros. Portanto, os sistemas lasers representam uma boa alternativa devido ao custo menor e rapidez com que realizam a avaliação de MMCs.

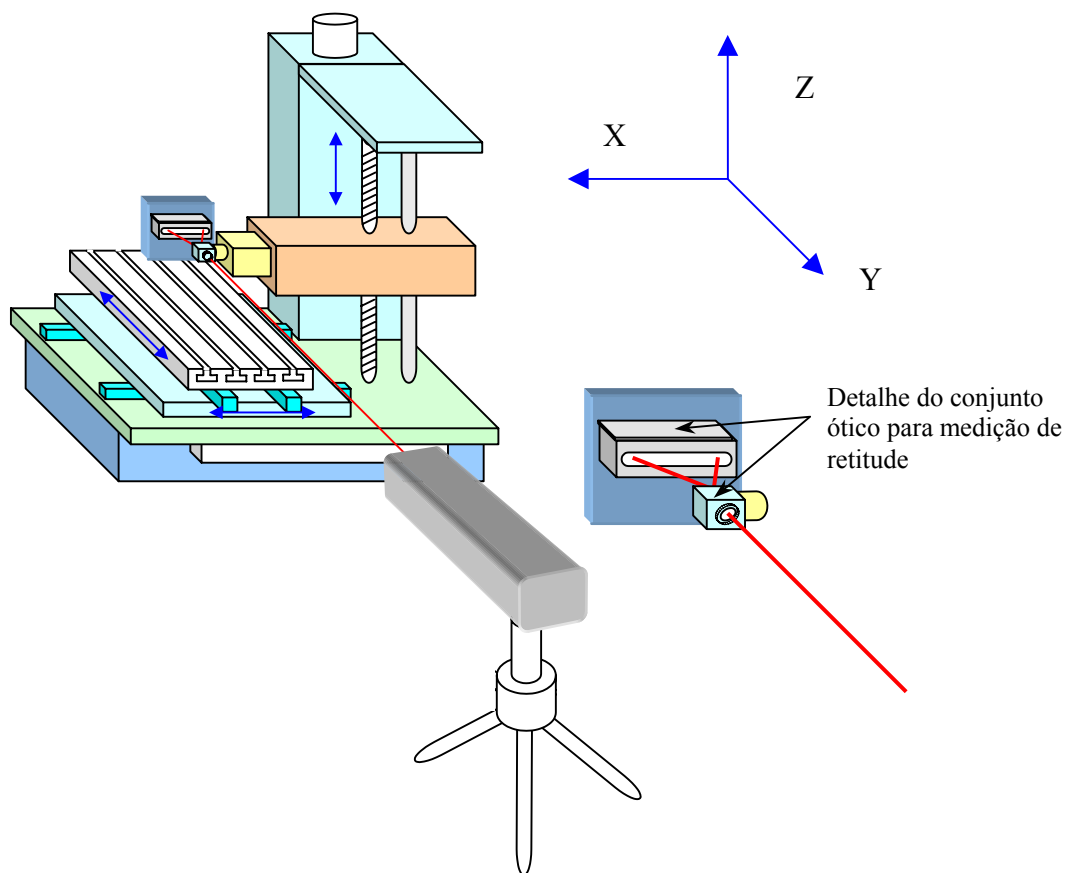


Figura 2.10 – Medição de retitude em X de uma MMC

2.8.3

Acoplamento a dispositivos de medição linear

O sistema laser de medição também pode ser utilizado para ser uma referência na calibração de padrões, tais como: blocos-padrão, calibradores tampão, anéis lisos e roscados e pinos-padrão, dentre outros. Para a realização da calibração dos padrões citados, utilizando-se um sistema laser de medição como referência, deve-se realizar uma adaptação colocando-se o prisma de medição acoplado ao carro móvel, conforme a figura 2.11. Quando o carro móvel se desloca, o comprimento medido é indicado no mostrador do sistema laser de medição.

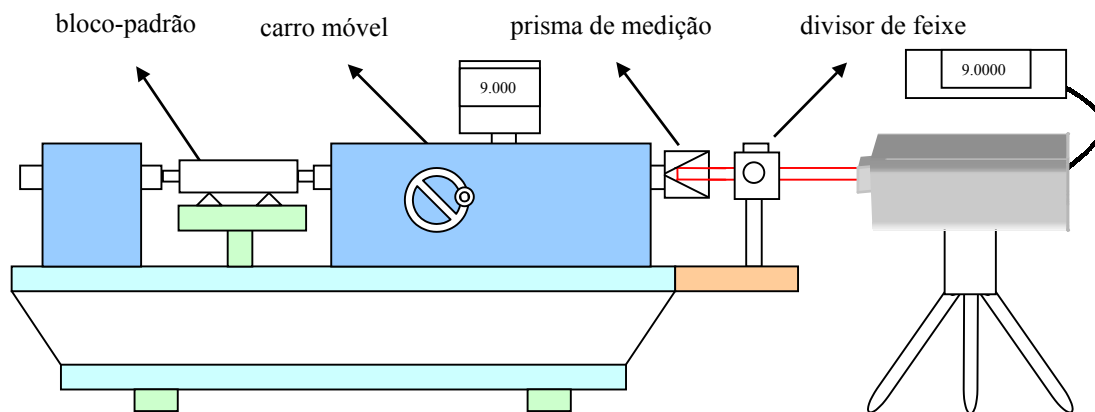


Figura 2.11 – Montagem de um laser para medição de bloco-padrão por comparação

A maioria das máquinas de medição linear é composta por partes ópticas, escalas ou réguas. As réguas ou escalas indicam, normalmente, os algarismos inteiros do número que representa o valor medido, enquanto a parte óptica é utilizada para visualizar os algarismos decimais do valor medido. O operador quando observa, no microscópio, os valores indicados da parte decimal os estima em função da resolução visual, o que representa uma fonte de erro de leitura. Na calibração de padrões utilizando o sistema laser de medição, as indicações da escala da máquina são substituídas pelas indicações no mostrador do laser, eliminando assim o erro de leitura devido à resolução visual do operador.

Um outro motivo para se utilizar o sistema laser como referência para calibração de padrões de comprimento é que essas máquinas, na maioria dos casos, possuem resolução de $0,1 \mu\text{m}$, quando a resolução do sistema laser é de $0,01 \mu\text{m}$, o que acarreta uma diminuição da incerteza de medição na calibração dos padrões de comprimento.